

審査の結果の要旨

氏名 柳澤 亮人

スマート社会の構築に向け、物理空間から情報空間に情報を取り込むため、高密度かつ広範囲にセンサーノードを敷設する必要がある。その際に必要となる膨大な数のセンサーノードの電源確保は重要な技術課題の一つであり、理想的にはほぼメンテナンスフリーな運用が可能となるエネルギーハーベスティング技術による解決が期待されている。熱電変換素子は、未利用熱を電気に変換しセンサーノードを駆動させることが可能であり、低環境負荷、低コスト、高スループットなどの実用上重要な特性を備えた熱電変換材料および素子の開発が求められている。

本論文は、「フォノンニック結晶ナノ構造を用いた熱伝導制御と平面型シリコン熱電変換エネルギーハーベスタ」と題して、フォノンニック結晶ナノ構造を形成した単結晶シリコン薄膜における準バリスティック熱伝導に関する知見を得るとともに、多結晶シリコン薄膜にフォノンニック結晶ナノ構造を形成することで熱電変換効率を向上させ、その熱電薄膜を用いて素子を作製し、発電量密度の増強を実現しており、全7章から構成されている。

第1章では、「序論」と題して、熱電変換や熱電材料の基礎と、ナノ構造を形成したシリコン熱電材料と平面型シリコン熱電発電素子に関する先行研究について述べ、本研究の目的と手法に続き最後に論文の構成を述べている。

第2章では、「ナノスケールにおけるフォノン輸送及び熱伝導」と題して、固体中の熱伝導、フォノンとその輸送およびナノスケールで発現する特徴的な熱輸送現象について、本論文の理解に不可欠な基礎的知識について述べている。

第3章では、「試料作製と測定方法」と題して、本研究で用いた平面型シリコン熱電変換素子に形成したフォノンニックナノ構造とマイクロ構造に関するプロセス手法、および熱伝導率を取得するためのマイクロサーモリフレクタンス法とシミュレーションを用いた実験データの解析方法を述べている。

第4章では、「ナノ構造化シリコン薄膜における熱電変換性能指数の最適化」と題して、多結晶シリコン薄膜にフォノンニックナノ構造を形成することで熱電変換材料の性能指数を向上させる手法について述べている。性能指数を最大化するため、イオン注入によるドーズ量とアニール時間の最適化を行い、フォノンニックナノ構造の円孔半径を主なパラメータとして系統的な構造を作製し、熱

伝導率と電気伝導率を測定することで円孔半径の依存性について得た結果について述べている。人工結晶構造のうち3種類について比較し、ハニカム格子が最も良い性能を示すことを見出し、その理由について議論している。

第5章では、「フォノンニック結晶ナノ構造を用いた平面型熱電変換素子の作製と評価」と題して、平面型ユニレグシリコン熱電発電素子について、発電量密度を最大化するためのシミュレーションを行った結果を示し、その設計に基づいて作製した構造のプロセス手法について述べている。また、作製した熱電素子の内部電気抵抗や温度差を印可したときの熱起電力について述べ、ナノ構造を形成することで、形成しない薄膜と比較することで10倍の発電量密度の向上に成功したことを報告している。また、熱抵抗モデルを用いた解析によって、熱電素子外部と内部の温度差の比率について考察し、素子の熱設計の重要性を指摘している。

第6章では、「キャップ構造の導入による発電量の向上」と題して、前章で試作した熱電素子の問題点を解決し、大幅に発電量密度の向上に成功した素子作製法および構造と発電量密度について報告している。熱電材料と電極間の界面抵抗について詳細に測定・解析し、低減する方法とその効果について示した。また、上部キャップ構造とレジストスペーサの導入により、熱電材料に印可される温度差を前章の素子の20倍以上向上させることに成功したことを報告している。これらの工夫により、素子外部の温度差が10 Kで発電量密度が $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ のレベルに達することが報告された。また、熱抵抗回路もでるによる解析も行い、本素子の課題について述べ、先行研究との比較を行うことで、本研究の位置づけと差別化について議論している。

第7章では、「結論」と題して、各章の要点と主要な研究成果を総括し、今後の展望について述べている。

以上、これを要するに、本論文は、フォノンニック結晶ナノ構造を形成した単結晶シリコン薄膜における準バリスティック熱伝導に関する知見を得るとともに、多結晶シリコン薄膜を用いた平面型熱電変換素子の設計、作製および性能評価と解析を行い、フォノンニック結晶ナノ構造を形成することで熱電変換材料の性能指数および発電量密度が向上することを示すとともに、本熱電素子においてコンタクト抵抗と素子の熱設計の重要性を明確化し、プロセスの改善と放熱構造の導入によって発電量密度を大幅に向上させ、熱電変換に関する分野の進展に寄与する成果を論じたものであり、電子工学に貢献するところが少なくない。

よって、本論文を博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。